

**ÍNDICE**

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJECTIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 Curricular.....	3
2.2 Didáctico .....	3
2.3 Académico .....	3
<b>3. INFORMAÇÕES GERAIS.....</b>	<b>4</b>
3.1 Definição.....	4
3.2 Origens históricas .....	4
3.3 Aplicação da energia eólica para a geração de electricidade .....	6
3.4 Situação actual .....	6
3.5 Países que se destacam .....	6
<b>4. TURBINAS EÓLICAS .....</b>	<b>7</b>
<b>5. VENTO COMO RECURSO ENERGÉTICO.....</b>	<b>10</b>
5.1 Potencial Eólico .....	10
5.2 Área de varrimento .....	11
5.3 Variação da velocidade do vento com a altura .....	12
5.4 Densidade de Potência Eólica .....	14
<b>6. TEORIA DE BETZ.....</b>	<b>14</b>
<b>7. COMPORTAMENTO DOS VENTOS EM MOÇAMBIQUE.....</b>	<b>15</b>
<b>8. DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO DE TURBINA EÓLICA.....</b>	<b>17</b>
8.1. Calculo do protótipo.....	18
8.2 Componentes da turbina .....	22
<b>9. TESTE DE PERFORMANCE DE TURBINA EÓLICA DE PEQUENO PORTE .....</b>	<b>23</b>
<b>EM TÚNEL DE VENTO.....</b>	<b>23</b>
9.1 Estrutura do teste .....	24
9.2 Resultados do teste .....	26
<b>10. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
<b>11. MODELOS MATEMÁTICOS PARCIAIS .....</b>	<b>32</b>
<b>12. MODELO MATEMATICO GLOGAL .....</b>	<b>44</b>
<b>10. CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>11. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>52</b>
<b>14. ANEXOS.....</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes tormentos do Mundo de hoje é a questão relativa à energia, o aproveitamento desta ainda não atingiu um nível satisfatório, visto que a maior parte da energia utilizada no planeta é de origem não renovável, seja de fonte mineral, atómica, térmica ou **das águas**. A energia pode ser utilizada de forma mais civilizada e menos dispendiosa e agressiva ao meio ambiente, por meios de fontes renováveis como a energia eólica, solar, das marés, geotérmica e de outras mais.

Este trabalho tem como objectivo a análise do aproveitamento da energia eólica, que como todas as demais possui certas vantagens e desvantagens, o que a faz diferente não é só um facto ou outro, é o conjunto como um todo.

Além desta ser uma fonte de energia renovável, possui uma certa diferença em relação às demais, pois pode ser utilizada para o fornecimento de energia para pequenas populações onde não há um acesso de energia directo e também não necessita de grandes investimentos.

Quando se trata de energia eólica há desvantagens que devem ser levadas em conta, como o barulho provocado, que não é muito elevado se o módulo for frequentemente vistoriado, a área ocupada, que deve ser específica (sem muitas elevações e civilizações por perto), e principalmente como esta tecnologia ainda não está totalmente desenvolvida o seu custo ainda é um pouco elevado, de modo que é muito difícil a população ter o seu próprio fornecimento de energia eléctrica gerada por meios eólicos e também o seu aproveitamento ainda não é satisfatoriamente elevado, entretanto esse entraves podem ser superados com o desenvolvimento desta tecnologia.

## **2. OBJECTIVOS**

### **2.1 Curricular**

Com o trabalho o autor pretende em primeiro lugar, suprir uma exigência curricular, que é a apresentação de um trabalho de final de curso.

### **2.2 Didáctico**

A concepção do trabalho foi feita de modo que possa servir também como material didáctico a nível do Departamento de Engenharia Mecânica e na faculdade em geral, não só como material de consulta e apoio, sobretudo, como material de reflexão e discussão dos aspectos que este procura vincar, o que constitui um contributo bastante valioso.

### **2.3 Académico**

Fazer o estudo da influência da velocidade do vento e do ângulo das pás de um aerogerador na geração de energia eléctrica.

### 3. INFORMAÇÕES GERAIS

#### 3.1 Definição

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento) [2]. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de electricidade, ou cata-ventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento de água [4].

O termo *eólico*, tal como muitos dos que usamos hoje na nossa linguagem, provem do latim *Aeolicus*, pertencente ou relativo a [Éolo](#), Deus dos ventos na [mitologia grega](#) e, portanto, pertencente ou relativo ao vento [2].



*Cata vento*



*Barco a vela*



*Turbina eólica*

**Figura.1. Exemplos de aplicações da energia eólica**

#### 3.2 Origens históricas

É impossível apontar o momento preciso na história, em que o homem parou de vagar em torno da terra na busca de alimento e abrigo e começou a reflectir sobre as forças que governavam a sua existência.

**Segundo [1]**, tudo indica que as primeiras utilizações de energia eólica deram-se com as embarcações, algumas publicações mencionam vestígios de sua existência já por volta de 4.000 a.C., recentemente testemunhado por um barco encontrado num túmulo sumeriano da época, no qual havia também remos auxiliares.

Por volta de 1.000 a.C. os fenícios, pioneiros na navegação comercial, utilizavam barcos movidos exclusivamente a força dos ventos. Ao longo dos anos vários tipos de embarcações a vela foram desenvolvidos, com grande destaque para as Caravelas – surgidas na Europa no século XIII e que tiveram papel destacado nas Grandes Descobertas Marítimas.

As embarcações a vela dominaram os mares durante séculos, até que o surgimento do navio a vapor, em 1807 veio dividir este domínio, mas pelo facto de exigir menores despesas em contrapartida a menor regularidade oferecida no tempo dos trajectos, o veleiro conseguiu manter o páreo por um bom tempo, só vindo a perder a concorrência no início do século XX, quando foi praticamente abandonado em favor do vapor.

**Segundo [2]**, Os persas começaram a usar a força do vento poucos séculos antes de Cristo, e pelo ano 700 DC, eles estavam construindo moinhos de vento verticais elevados ou *panemones*, para serem usados como força nas mós, na moagem de grãos.

Outras civilizações do oriente médio, em especial os muçulmanos continuaram onde os persas deixaram e construíram seus próprios moinhos de vento. Com o retorno das cruzadas, pensou-se que eles tinham trazido ideias sobre moinhos de vento e desenhos para a Europa, mas provavelmente foram os holandeses que desenvolveram o moinho de vento horizontal, com hélices, comuns nos campos dos holandeses e ingleses.

### 3.3 Aplicação da energia eólica para a geração de electricidade

Assim como a energia hidráulica, a energia eólica é utilizada há milhares de anos com as mesmas finalidades, a saber: bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem energia mecânica.

Para a geração de electricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo (década de 1970), é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial.

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede eléctrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca. Actualmente, existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no mundo.

Recentes desenvolvimentos tecnológicos (sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas etc.) têm reduzido custos e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos. O custo dos equipamentos, que era um dos principais entraves ao aproveitamento comercial da energia eólica, reduziu-se significativamente nas últimas duas décadas.

### 3.4 Situação actual

- \_ 30.000 Turbinas de grande porte no mundo;
- \_ 13.500 MW de capacidade instalada;
- \_ 30.000 MW até 2030 (Comité Internacional de Alterações Climáticas).

### 3.5 Países que se destacam

- \_ Alemanha – 16%
- \_ Dinamarca – 12%
- \_ Estados Unidos

- \_ Índia
- \_ Espanha

#### 4. TURBINAS EÓLICAS

Aerogeradores, turbinas Eólicas, geradores eólicos, máquinas eólicas, e cata-ventos são os diversos nomes utilizados para as máquinas capazes de transformar a energia cinética dos ventos em energia mecânica, ou em energia eléctrica [3].

Normalmente estas máquinas são utilizadas para a geração de energia eléctrica através de acoplamento com geradores, mas também, turbinas eólicas podem ser utilizadas em sistemas de bombeamento ou outros sistemas mecânicos.

As turbinas eólicas são classificadas quanto à sua forma construtiva:

- Turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH), e
- Turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV). e quanto à sua potência nominal:
- Pequeno Porte (até 50kW de potência),
- Médio Porte (potência de 50 a 1000kW), e
- Grande Porte (acima de 1MW de potência).

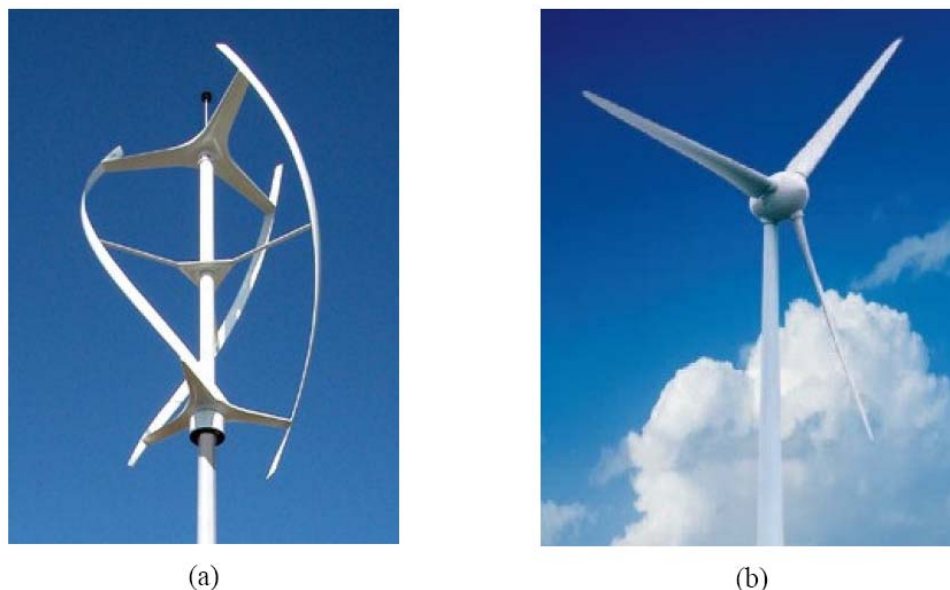


Figura 2 – Turbinas eólicas de eixo vertical (a) e horizontal (b)/Fonte [3]

As TEEH são as mais difundidas no mercado, e têm como característica principal a necessidade de um sistema de controle para posicionar o rotor na direcção predominante de vento.

Os aerogeradores possuem três componentes básicos, o rotor com as pás, a gôndola (nacele) e a torre.

Na gôndola ficam os principais componentes tais como o gerador eléctrico, caixa multiplicadora de velocidades, eixos, mancais, sistema de freios sistema de controle e mecanismos de giro da turbina.

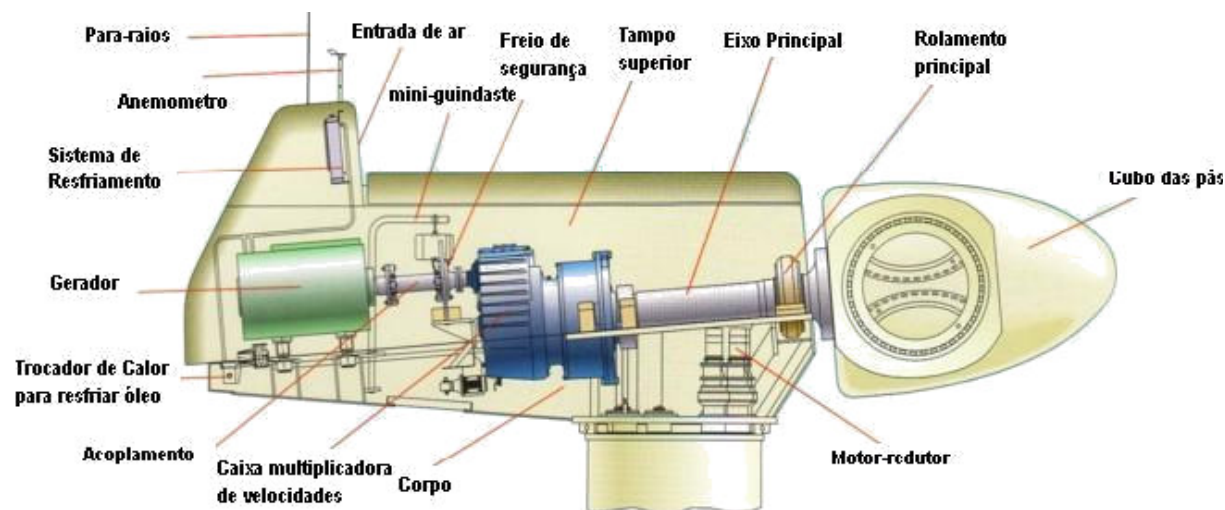
O rotor apresenta geralmente, um conjunto de pás, podendo ter controle passivo ou activo das mesmas para operar numa determinada rotação. Na maioria das máquinas o eixo que transmite o torque das pás apresenta uma velocidade de rotação baixa sendo necessário aumentar a rotação utilizando um multiplicador de velocidades de engrenagens. Após o multiplicador é conectado ao gerador eléctrico que transforma a energia mecânica em eléctrica.

O gerador eléctrico pode ser assíncrono (indução) apropriado para trabalhar com rotação constante ou gerador síncrono utilizado em sistemas com rotação variável.

Existem também turbinas eólicas de grande porte que utilizam geradores síncronos de



ímãs permanentes que operam com baixa rotação dispensando a caixa multiplicadora.



**Figura 3 - Componentes de uma TEEH**

As turbinas apresentam um sofisticado sistema de controle que permite otimizar os ganhos de energia posicionando o rotor num plano perpendicular à velocidade do vento. A máquina possui sistemas para realizar operações de segurança freando a máquina para velocidades muito altas (acima de 25 m/s). As pás podem ser fixas ou podem mudar o ângulo de passo.

As turbinas eólicas apresentam diferentes tipos de controle para frenagem em velocidades de vento elevadas - são os controles por Stall ou Pitch. No controle por stall, em altas velocidades de vento, há um desprendimento do fluxo de vento no perfil aerodinâmico, gerando vórtices e assim aumentando o arrasto e diminuindo a velocidade angular ou rotação.

Já no controle por pitch, existe um sistema que gira as pás posicionando-as perpendicularmente ao vento, diminuindo a sustentação aerodinâmica e, consequentemente, a rotação do rotor.

O sistema de controle por ângulo de passo das pás, apesar de mais complexo e maior custo e o mais utilizado. Apresenta uma curva de potencia que permite maiores ganhos de energia sendo menores os esforços de transmissão. O sistema de controle por stall

apresenta menor custo do rotor, contudo maior custo no sistema de freios. Requer um sistema auxiliar para protecção em altas velocidades.

## 5. VENTO COMO RECURSO ENERGÉTICO

### 5.1 Potencial Eólico

Existe uma regra para o calculo da potência gerada pelos cata-ventos e turbinas de vento. É importante ressaltar que esta regra é teórica e na prática, não se consegue converter toda a potência (teórica) em potência útil. A taxa de conversão é de aproximadamente de 59%, quando esta-se diante de um sistema ótimo.

Segundo [5] - potência é igual ao trabalho (Energia) dividido pelo tempo:

$$P = \frac{W}{\Delta t}, \quad (W) \dots\dots\dots 5.1$$

O trabalho realizado pelo vento que neste caso é igual a sua energia cinética é:

$$W = E_c = \frac{mV^2}{2} \dots\dots\dots 5.2$$

$$\text{então: } P = \frac{\frac{mV^2}{2}}{\Delta t} = \frac{mV^2}{2\Delta t}, \text{ mas como } \frac{m}{\Delta t} = \dot{m} = Q = \rho \times V \times A, \text{ finalmente tem-se:}$$

$$P = \frac{\rho V^3 A}{2} \dots\dots\dots 5.3$$

Onde: V- é a velocidade média do vento em m/s

A- é área varrida pelas hélices do rotor

$\rho$  - é a densidade do ar

Para casos em que a densidade do vento corresponde às condições de pressão a nível do mar e a uma temperatura de 15°C, em unidades métricas, esta fórmula pode ser simplificada por:

$$P = 0,625 \times A \times V^3, \quad [W] \dots\dots\dots 5.4$$

O poder do vento é proporcional a densidade do ar, isso significa que quanto maior for altitude, tanto menor será a potência do vento à mesma velocidade do vento.

## 5.2 Área de varrimento

Segundo [7], a potência eólica também é proporcional a área de varrimento:

$$A = \pi \times R^2, \quad m^2 \dots\dots\dots 5.5$$

Onde: R – é o raio da turbina

O potencial do vento é mais significativo que o raio da turbina.

Diâmetro do Rotor Vs. Potência

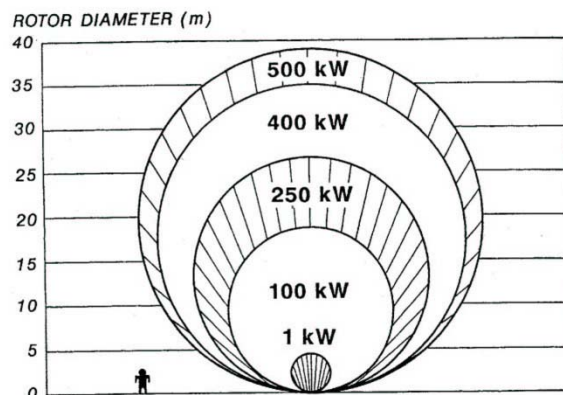


Figura 4. Relação entre o raio do rotor e a potência/ Fonte [7]

### 5.3 Variação da velocidade do vento com a altura

Segundo [5], o atrito entre a superfície terrestre e o vento produz, como consequência, um retardamento do vento. As camadas mais baixas de ar retardam as que lhes estão por cima, resultando numa variação de velocidade média do vento com a altura do solo.

A velocidade do vento aumenta drasticamente com a altura dependendo do local. A extensão pela qual a velocidade do vento aumenta com a altura é governada por um fenómeno chamado "wind shear". A região de camada limite atmosférica se estende até uma altura de 100m (camada superficial) que é a zona de interesse para as turbinas eólicas.

A variação da velocidade do vento com a altura (h) do solo é expressa pela seguinte fórmula empírica:

$$V = V_1 \times \left( \frac{h}{h_1} \right)^\alpha \quad (\text{m/s}) \dots\dots\dots 5.6$$

A expressão efectiva é obtida com os valores de  $\alpha$  dados pela expressão:

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \ln V_1}{1 - 0,088 \left( \frac{h_1}{10} \right)} \dots\dots\dots 5.7$$

Apresentamos abaixo uma figura que ilustra as diferentes áreas (urbana, subúrbios, ou ao nível do mar), e a relação entre suas alturas e velocidades de ventos.

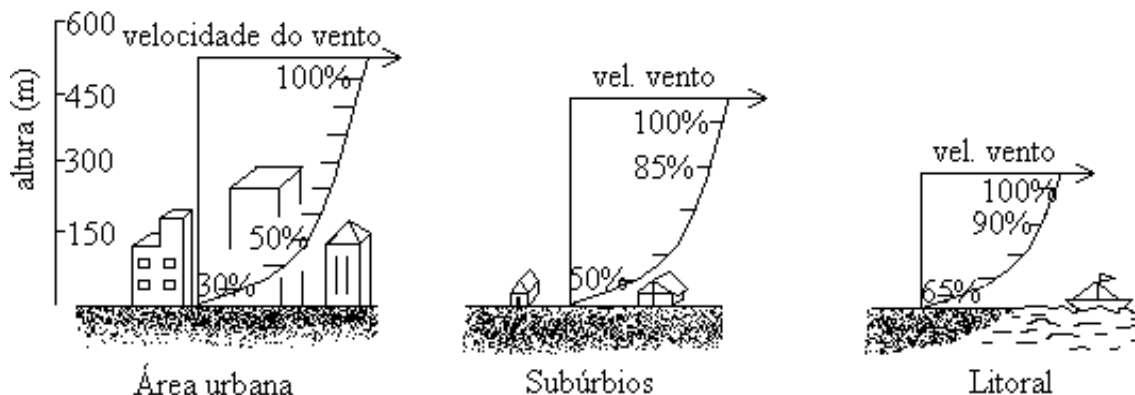


Figura 5. Obstáculos ao vento/ Fonte [5]

Segundo [5], com este esquema, podemos perceber que:

- Regiões que possuem construções elevadas como prédios, só atingem velocidades razoáveis de vento após uma elevada altura;
- Já nas áreas em que só existem casas e pequenas construções, esta taxa diminui e assim, em alturas um pouco menores já temos ventos satisfatórios;
- No último caso mostrado, ao nível do mar, se vê que os ventos já são muito mais rápidos em altitudes menos elevadas que nos exemplos anteriores.

Como já dito acima, a potência teórica gerada pelas "máquinas de vento" varia com o cubo da velocidade do vento local. Isto, mais uma vez evidencia a importância de uma análise prévia do lugar onde se pretende instalar os equipamentos, para que se tenha um aproveitamento melhor da potencialidade da energia eólica.

Relevo	Coeficientes ( $\alpha$ )
Areia, superfície do oceano	0,10
Capim/relva baixa, terreno descoberto	0,16
Capim alto ou culturas de Alturas baixas	0,18
Culturas de Alturas elevadas ou florestas baixas	0,20
Florestas altas	0,30
Subúrbios arborizados e pequenas cidades	0,45

Tabela 1. Coeficientes de variação da velocidade em função da altura/ Fonte [7]

#### 5.4 Densidade de Potência Eólica

Segundo [7], por causa da variabilidade dos ventos, a equação de cálculo da potência do vento deveria ser usada somente para velocidades de vento instantâneas e não para médias de longo termo. Na realidade o vento varia constantemente. A densidade de potência eólica é na maior parte dos lugares entre 1,7 a 3 vezes maior do que a calculada a partir do valor de velocidade média do vento. Por esta razão a grandeza densidade de potência eólica é utilizada como termo de comparação dos potenciais eólicos de diversas localizações geográficas.

$$\frac{W}{A} = 0.625 \times V^3 \left[ \text{Watts} / m^2 \right] \dots\dots\dots 5.8$$

#### 6. TEORIA DE BETZ

Segundo [6] - o rendimento global do sistema eólico relaciona a potência disponível do vento com a potência final que é entregue pelo sistema. Os rotores eólicos ao extraírem a energia do vento reduzem a sua velocidade; ou seja, a velocidade do vento frontal ao rotor (velocidade não perturbada) é maior do que a velocidade do vento atrás do rotor (na esteira do rotor). Uma redução muito grande da velocidade do vento faz com que o ar circule em volta do rotor, ao invés de passar através dele.

A condição de máxima extracção de energia verifica-se para uma velocidade na esteira do rotor igual a  $1/3$  da velocidade não perturbada. Em condições ideais, o valor máximo da energia captada por um rotor eólico é limitado pela eficiência de Betz dada pelo factor  $16/27$  ou  $0,593$ . Em outras palavras,  $59,3\%$  da energia contida no fluxo de ar pode ser teoricamente extraída por uma turbina eólica. Na prática, entretanto, o rendimento aerodinâmico das pás reduz ainda mais este valor. Para um sistema eólico, existem ainda outras perdas, relacionadas com cada componente (rotor, transmissão, caixa multiplicadora e gerador). Além disso, o fato do rotor eólico funcionar em uma faixa limitada de velocidade de vento também irá contribuir para reduzir a energia por ele captada.



Figura 6. Esquema da redução de velocidade em volta do rotor/ Fonte [7]

## 7. COMPORTAMENTO DOS VENTOS EM MOÇAMBIQUE

Segundo Cunha (1972), o regime dos ventos em Moçambique é extensivamente influenciado pela circulação da atmosfera na África meridional que, por sua vez, está condicionada por vários centros de acção cujos princípios, em relação a Moçambique são:

- O anticiclone subtropical do indico,
- A cintura de baixas pressões equatoriais (zona de convergência inter tropical),

- A depressão de origem térmica que se desenvolve sobre o continente, na época quente,
- Um anti ciclone de origem térmica que se estabelece na época seca na parte meridional do continente africano,
- Os vales depressionais que acompanham o movimento das depressões subpolares que afectam por vezes as regiões do litoral das províncias de Maputo, Gaza, e Inhambane.

Em todo o litoral Moçambicano, o vento tem velocidade média na ordem de 10km/h, atingindo os valores mais altos, na ordem dos 15km/h, no extremo sul do País. Já no interior, o vento diminui a sua velocidade atingindo os valores mais baixos na ordem dos 4 – 6 km/h nas províncias de Zambézia, Tete, e Gaza, com excepção das regiões montanhosas do Niassa onde o vento atinge a velocidade de aproximadamente 10km/h (Cunha 1972).

A velocidade do vento, como se sabe, observa-se em cada dia, e é variável no espaço e no tempo. Sendo a velocidade do vento um parâmetro meteorológico de grande interesse na actualidade e para o futuro da humanidade, surge a necessidade do estudo da sua distribuição no espaço, tempo e distribuição media.



Os dados recolhidos são apresentados na tabela que se segue:

Estação	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Maputo	9,3	8,9	7,9	7,4	7,6	7,6	7,9	9,2	9,5	10,1	9,8	9,9
Xai-Xai	8,7	8,1	6,5	5,5	5,5	5,5	5,8	7,6	9,9	10,1	9,9	8,6
Inhambane	7,0	7,5	5,6	5,0	5,5	4,8	5,6	6,4	7,5	8,0	8,1	7,5
Beira/Aero	13,2	13,1	12,7	11,6	10,6	10,6	11,5	12,7	14,6	15,4	15,2	14,2
Chimoio	8,5	9,2	8,4	7,8	8,0	7,9	8,2	8,8	9,3	9,8	9,6	9,1
Quelimane	8,8	8,6	7,9	7,2	6,6	7,0	7,4	8,8	11,2	12,6	12,0	10,3
Tete	4,6	4,7	5,3	5,8	4,7	4,7	5,5	7,8	9,8	10,8	8,9	5,7
Nampula	8,6	8,9	8,9	9,3	10,4	11,5	11,4	11,1	11,9	12,8	12,1	10,0
Lichinga	12,1	11,9	13,5	15,9	14,6	14,7	15,6	15,2	16,3	17,5	16,3	13,6
Pemba	8,7	8,1	7,2	9,0	11,9	13,3	13,4	11,2	10,4	10,0	10,6	9,3

Tabela 2. Valores de Velocidade Média mensal do vento em m/s das cidades capitais e Moçambique/Serviços Nacionais de metriologia.

Embora os dados de algumas cidades não sejam compreensivos durante todo o ano, como é o caso de Xai-Xai, Tete, Nampula, Quelimane, e Pemba, pode-se concluir que a velocidade média em cada uma das cidades capitais é bastante para accionar turbinas de pequeno porte para a produção de energia eléctrica, para além de bombear água para o consumo doméstico ou regadio de machambas.

## 8. DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO DE TURBINA EÓLICA

No presente trabalho construiu-se um protótipo de moinho de vento com 3 pás metálicas que será acoplado a um dínamo e será testado no túnel de vento.

O protótipo será dimensionado em função das dimensões do túnel de vento e as velocidades do vento da cidade de Maputo.

**Material usado para a construção do protótipo**

- Chapa de aço de construção galvanizada de 1mm de espessura;
- Chapa de aço de construção de 3mm de espessura;
- Varão de alumínio de Ø30mm;
- Varão de alumínio de Ø8mm
- Varão de aço de construção de Ø20mm
- Varão hexagonal de latão de Ø9mm
- Varão de teflon de Ø55mm
- Tubo de aço de construção de Ø30mm;
- Barra de madeira
- Parafusos;
- Aninhas de chapa e de mola
- Rolamentos.

**8.1. Calculo do protótipo****Características principais**

- Baixa densidade energética dos ventos;
- Intermitência com que sopram os ventos;

## Influência dessas características

- Na definição do modo de captação, conversão e aproveitamento dessa energia eólica;
- Nos custos da energia gerada;

## Detalhes técnicos

- Massa específica do ar.....1,2Kg/m<sup>3</sup>
- Necessidade de se interceptar uma área muito grande de corrente de ar para captar quantidade razoável de energia (turbinas de pás muito grandes).

## Dedução da potência geral na turbina

- Massa de ar que atravessa a superfície:

$$\text{Massa de ar} = m = \pi R^2 V_1 \rho \text{ kg/s} \dots\dots\dots 2.1$$

Onde: R – raio das pás;

V – velocidade do ar;

$\rho$  – densidade específica do ar.

- Energia cinética

$$E_c = \frac{mV_1^2}{2} \dots\dots\dots 2.2$$

- Potência disponível

$$P_0 = \frac{\rho \times \pi \times R^2 \times V_1^3}{2} \dots\dots\dots 2.3$$

**Cálculo do raio das pás:**

$$R = \sqrt{\frac{2P_0}{\rho\pi V_1^3}} \dots\dots\dots 2.4$$

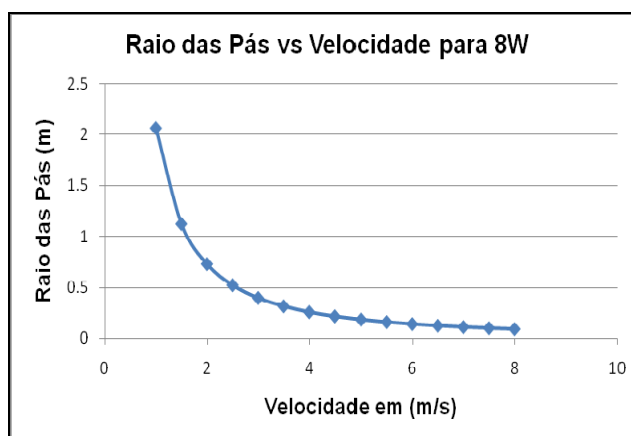
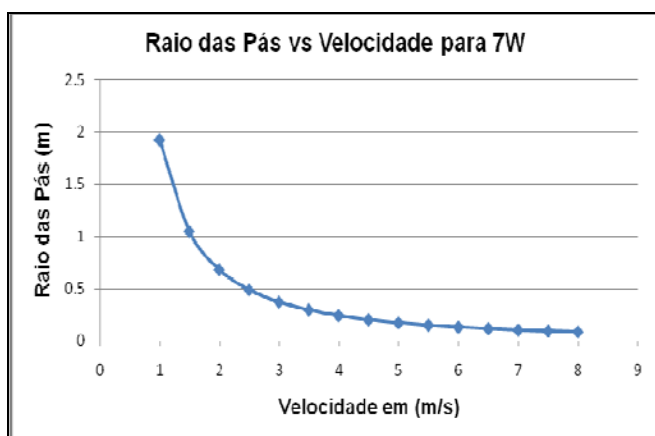
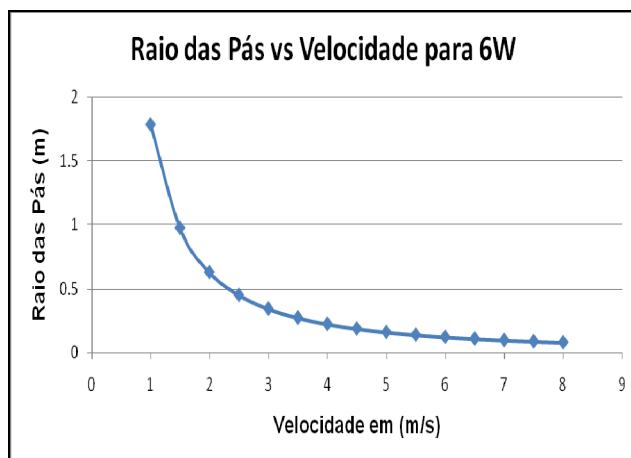
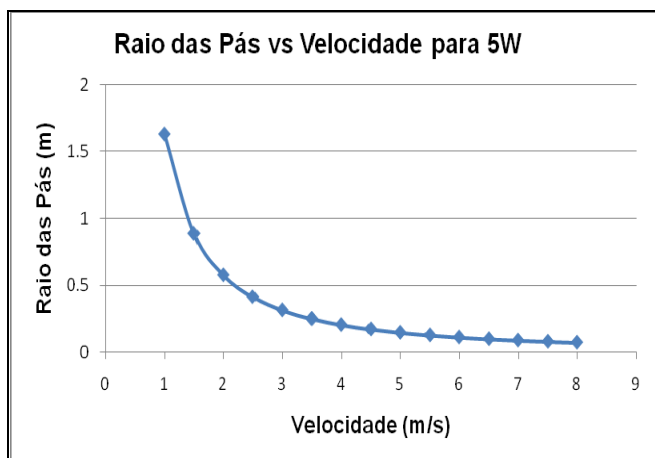
Em seguida apresentam-se os resultados obtidos dos cálculos do diâmetro das pás para as potências entre 5 e 12 W atendendo a variação de velocidade entre 1 e 8 m/s

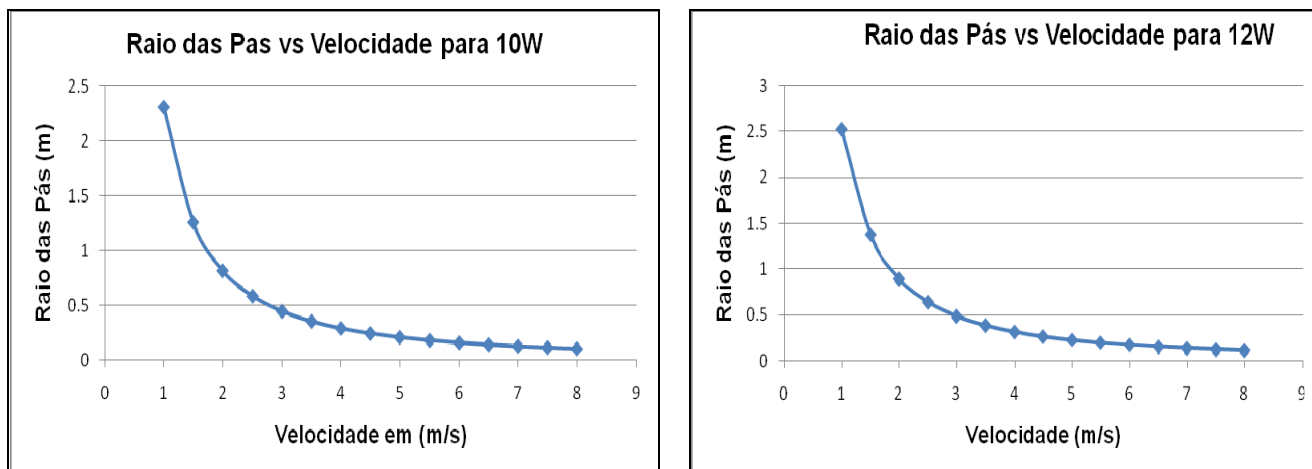
Em seguida apresentam-se os resultados obtidos dos cálculos do diâmetro das pás para as potências entre 5 e 12 W atendendo a variação de velocidade entre 1 e 8 m/s

Velocidade (m/s)	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Raio (m)					
		5 W	6W	7W	8W	10W	12W
1	1,2	1,63	1.78	1.93	2.06	2.30	2.52
1,5	1,2	0,87	0.97	1.05	1.12	1.25	1.37
2	1,2	0,57	0.63	0.68	0.73	0.81	0.89
2,5	1,2	0,41	0.45	0.49	0.52	0.58	0.64
3	1,2	0,31	0.34	0.37	0.40	0.44	0.48
3,5	1,2	0,24	0.27	0.29	0.31	0.35	0.38
4	1,2	0,20	0.22	0.24	0.26	0.29	0.31
4,5	1,2	0,17	0.19	0.20	0.21	0.24	0.26
5	1,2	0,14	0.16	0.17	0.18	0.21	0.23
5,5	1,2	0,13	0.14	0.15	0.16	0.18	0.20
6	1,2	0,13	0.12	0.13	0.14	0.16	0.17
6,5	1,2	0,10	0.11	0.12	0.12	0.14	0.15
7	1,2	0,09	0.10	0.10	0.11	0.12	0.14
7,5	1,2	0,08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12
8	1,2	0,07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11

Tabela 3. Resultados do cálculo do raio das pás

Dos dados obtidos construiu-se o gráfico das pás versus velocidade do vento e como era de esperar o diâmetro das pás diminui a medida que se aumenta a velocidade do vento.





**Figura 7. Gráfico das pás versus velocidade do vento**

Segundo os cálculos conclui-se que as pás terem um raio de 180mm, e o teste sera feito para uma velocidade num intervalo de velocidades de 4m/s a 8m/s. Estas dimensões sao escolhidas tendo em conta as dimensõess do tunel de vento.

As características do vento usadas para o cálculo são da provincia do Maputo, retiradas da tabela 3, que tem a velocidade media anual de 8 m/s.

## 8.2 Componentes da turbina

O projecto consistiu na construção de um protótipo de uma turbina eólica, composta pelas seguintes componentes:

Componente	Quantidade
Pás	3
Rotor	1
Veio	1
Rolamentos	2
Torre	1
Dínamo	1

**Tabela 4. Componentes da turbina eólica**

Para além dos parafusos, porcas, anilhas, bases de fixação usadas para a montagem da turbina e fixação no túnel de vento.



Figura 8. Turbina eólica fixada no túnel de vento.

## 9. TESTE DE PERFORMANCE DE TURBINA EÓLICA DE PEQUENO PORTE

### EM TÚNEL DE VENTO

Como complemento, este trabalho apresenta um teste de performance do protótipo da turbina eólica em túnel de vento. Este teste foi realizado no laboratório de resistência dos materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharias.

O método consiste basicamente no levantamento da curva de potência. Para isso é necessário medir a velocidade do vento e a potência da turbina.

A curva de potência é determinada fazendo-se a colecta simultânea dos dados de velocidade do vento, intensidade e voltagem produzidas pelo protótipo de turbina eólica por um tempo suficiente para que se possa obter dados com maior confiabilidade.

### **9.1 Estrutura do teste**

A estrutura de testes consiste basicamente em um túnel de vento onde se possa controlar a velocidade do vento. Esta velocidade é medida por meio de sensores denominados anemómetros.

O protótipo é posicionado em frente ao túnel de vento e sua potência é medida em função da tensão e intensidade produzidas pelo dínamo acoplado à turbina, figura 9 abaixo.



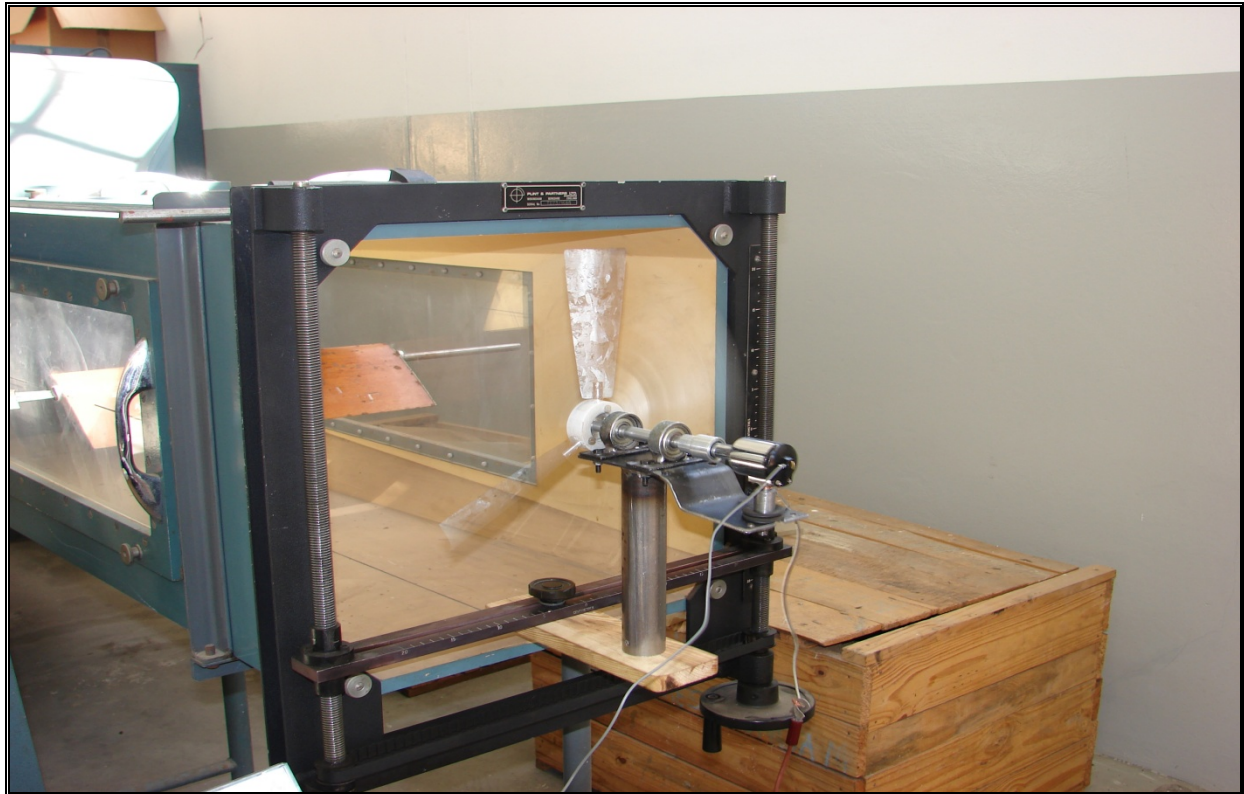


Figura 9. Montagem da turbina para teste

Os equipamentos de medição usados foram o amperímetro, voltímetro e o Reóstato.

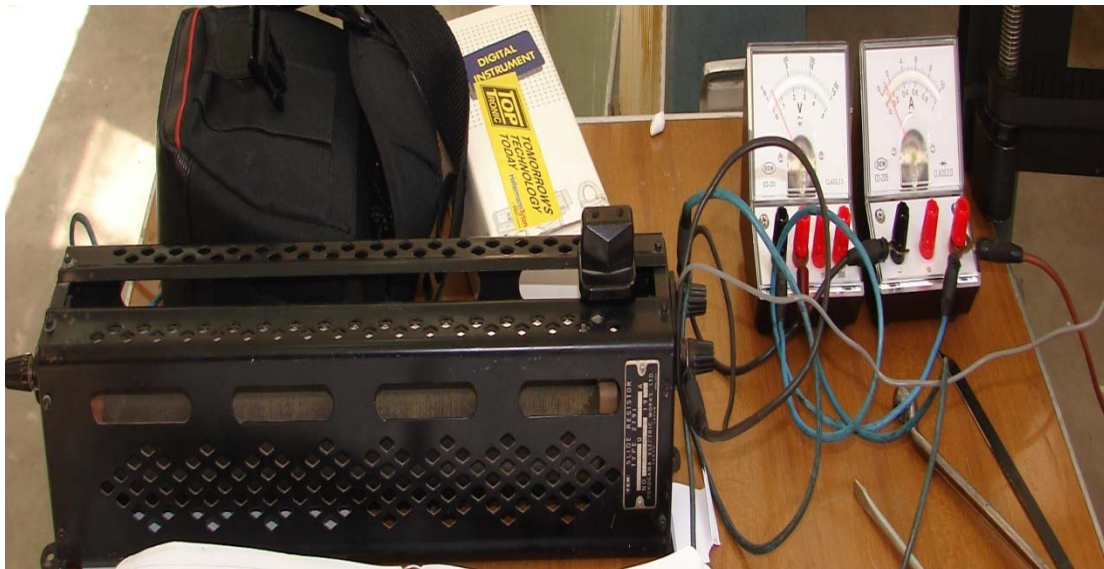


Figura 10. Equipamentos de medição usados para o teste

## 9.2 Resultados do teste

Durante os ensaios, foram realizadas três réplicas de colheita de dados para todos os ângulos de ataque das pás, nomeadamente 15°, 30°, 45° e 55° de modo a obterem-se resultados mais fiáveis. As médias dos valores de intensidade e tensão colhidos durante o ensaio para intervalos de velocidade de 4m/s a 8m/s estão apresentados nas tabelas que se seguem:

Ângulo de ataque das pás de 15°

Velocidade (m/s)	Tensão (V)	Intensidade (A)
4	0	0
5	0	0
6	0,05	0,01
7	1,4	0,28
8	1,6	0,34

Tabela 5. Resultados do teste para o ângulo de ataque de 15°

Ângulo de ataque das pás de 30°

Velocidade (m/s)	Tensão (V)	Intensidade (A)
4	0	0
5	0,4	0,12
6	0,7	0,18
7	1,0	0,22
8	1,2	0,26

Tabela 5.1. Resultados do teste para o ângulo de ataque de 30°

Ângulo de ataque das pás de 45°

Velocidade (m/s)	Tensão (V)	Intensidade (A)
4	0,1	0,02
5	0,3	0,05

6	0,5	0,12
7	0,6	0,15
8	0,8	0,18

Tabela 5.2. Resultados do teste para o ângulo de ataque de 45°

Ângulo de ataque das pás de 55°

Velocidade (m/s)	Tensão (V)	Intensidade (A)
4	0,1	0,04
5	0,2	0,08
6	0,3	0,1
7	0,5	0,12
8	0,7	0,14

Tabela 5.3. Resultados do teste para o ângulo de ataque de 55°

Ângulo de ataque das pás de 60°

Velocidade (m/s)	Tensão (V)	Intensidade (A)
4	0,05	0,02
5	0,1	0,04
6	0,2	0,06
7	0,3	0,08
8	0,4	0,1

Tabela 5.4 Resultados do teste para o ângulo de ataque de 60°

## 10. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Segundo [5], calcula-se a potência desenvolvida pela seguinte formula:

$$P = U \times I \quad [W] \dots\dots\dots 4$$

Onde: P - Potência em Watts

U - Tensão em Voltes

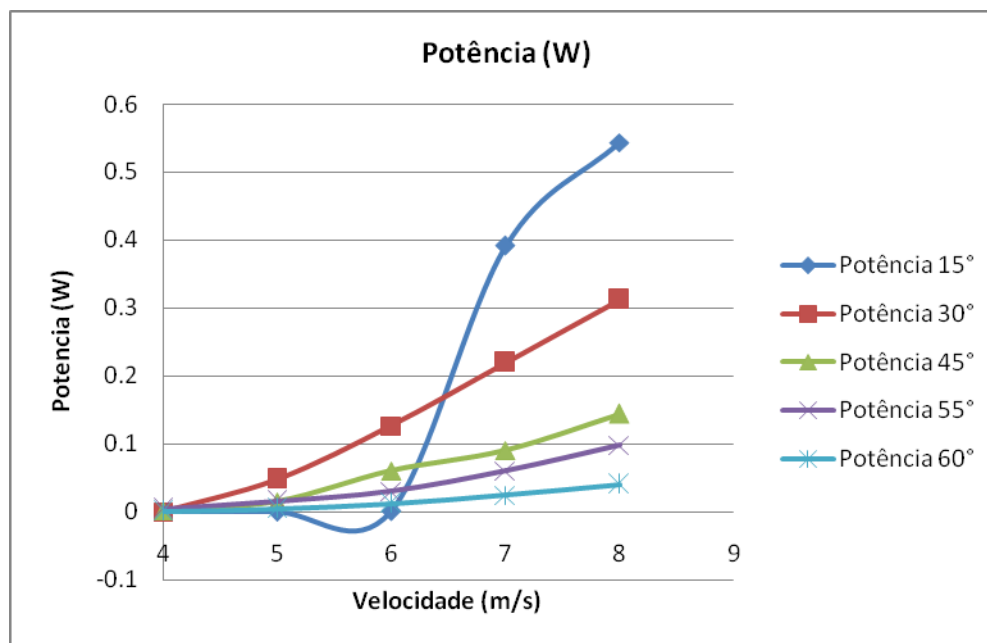
I - Intensidade em Amperes

A tabela que se segue representa os valores da potência para os diferentes ângulos de ataque:

Velocidade (m/s)	Potência 15°	Potência 30°	Potência 45°	Potência 55°	Potência 60°
4	0	0	0.002	0.004	0.001
5	0	0.048	0.015	0.016	0.004
6	0.0005	0.126	0.06	0.03	0.012
7	0.392	0.22	0.09	0.06	0.024
8	0.544	0.312	0.144	0.098	0.04

Tabela 6. Potência em função da velocidade para os diferentes ângulos de ataque das pás

- Pás com ângulo de ataque de 15° só se utilizam com velocidades a partir de 6m/s, com velocidades abaixo de 6m/s, a turbina não gira, e como consequência, não produz energia eléctrica.
- Pás com ângulo de ataque de 30° já têm um intervalo de velocidades ainda maior, comparativamente as pás com ângulo de ataque de 15°, elas começam a produzir energia eléctrica a partir da velocidade de 5m/s.
- Pás com ângulo de ataque de 45° produzem energia eléctrica com velocidades ainda menores (4m/s), embora seja uma energia de pequena magnitude comparativamente a produzida pelas pás de menor ângulo de ataque.
- Com o aumento dos ângulos de ataque das pás (55°), a turbina produz energia eléctrica com variação quase constante com o aumento da velocidades, embora de menor magnitude.
- Pás com ângulo de ataque de 60° produzem energia eléctrica constante com o aumento da velocidade, não tendo variações bruscas constatada é de 1 casa decimal com o aumento de velocidade na mesma proporção.



**Figura 11.** Gráfico de variação da potência em função da velocidade para os diferentes ângulos de ataque

A potência aumenta com o aumento da velocidade, aumentando bruscamente para menores ângulos de ataque das pás, e tendo para maiores ângulos de ataque um crescimento de 1 casa decimal com o aumento de velocidade na mesma proporção.

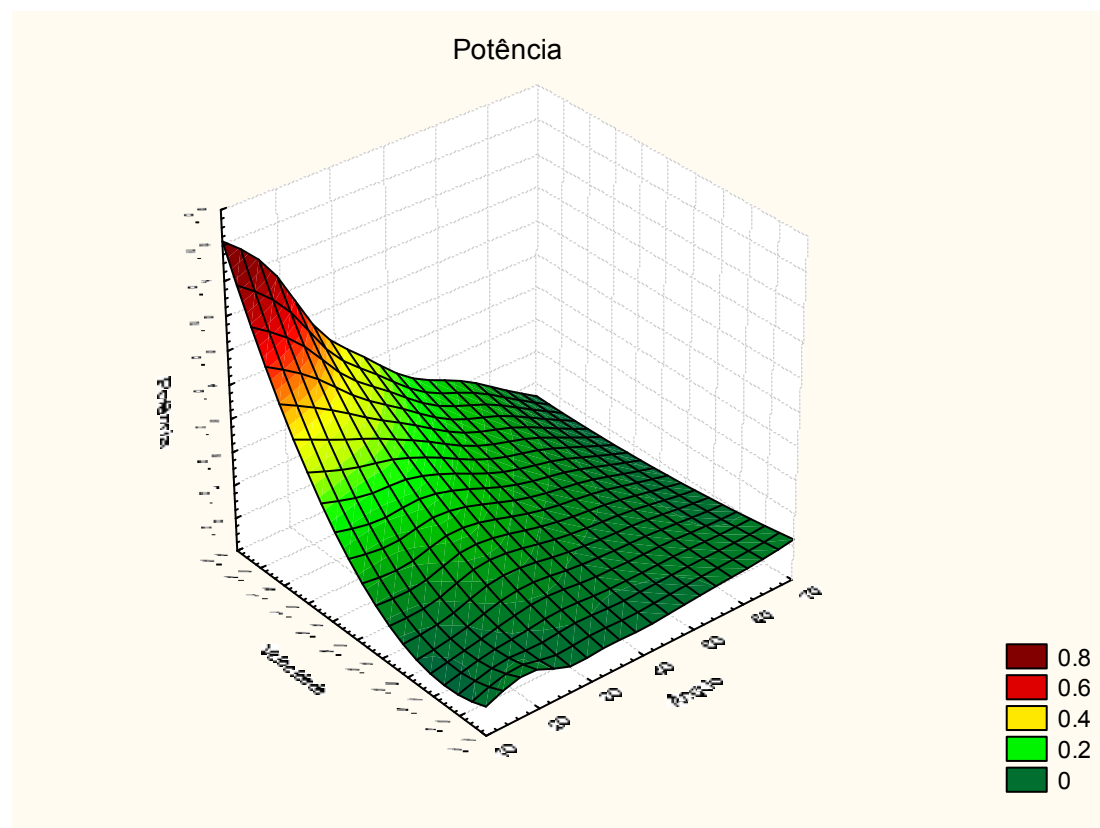


Figura 12. Representação tridimensional da potência em função da velocidade para os diferentes ângulos de ataque

## 11. MODELOS MATEMÁTICOS PARCIAIS

Desenvolveu-se um modelo matemático para cada teste realizado.

### Ângulo de ataque de 15°

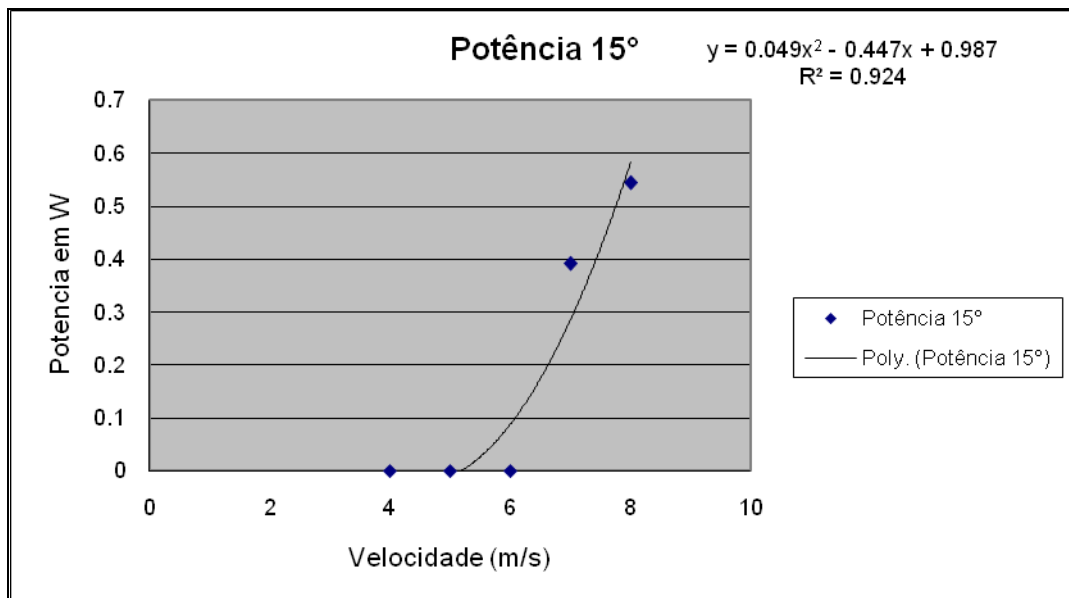


Figura 13. Gráfico do modelo matemático

O modelo matemático para a potência com um ângulo de ataque das pás de 15° é:

$$Y = 0,049X^2 - 0,447X + 0,987 \quad \dots\dots\dots 5.1$$

Onde: X - Velocidade em m/s



Substituindo os valores da velocidade na expressão 5.1, temos:

X	Y
4	-1.49
5	-0.613
6	0.026
7	0.427
8	0.59

**Tabela 7. Valores da potência calculados a partir do modelo matemático**

Comparando os valores da potência obtidos pelo modelo matemático e os valores obtidos no ensaio.

X	Y	Potência
4	-1.49	0
5	-0.613	0
6	0.026	0.0005
7	0.427	0.392
8	0.59	0.544

**Tabela 8. Valores da potência calculados a partir do modelo matemático e os obtidos a partir dos ensaios**

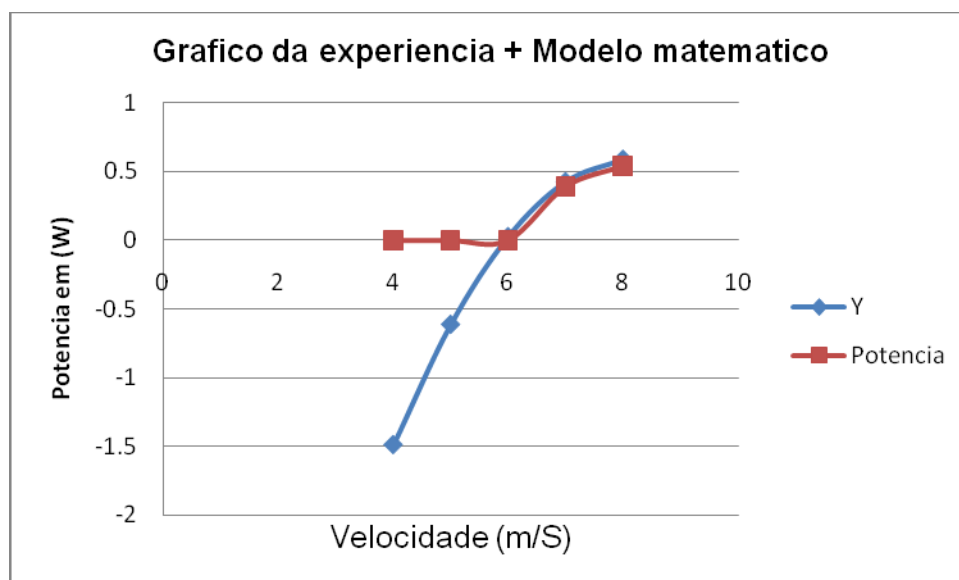


Figura 14. Gráfico da experiência + Modelo matemático

O modelo matemático tem pequeno desvio, o que leva a concluir que ele representa bem a situação real (é um modelo fiável).

### Ângulo de ataque de 30°

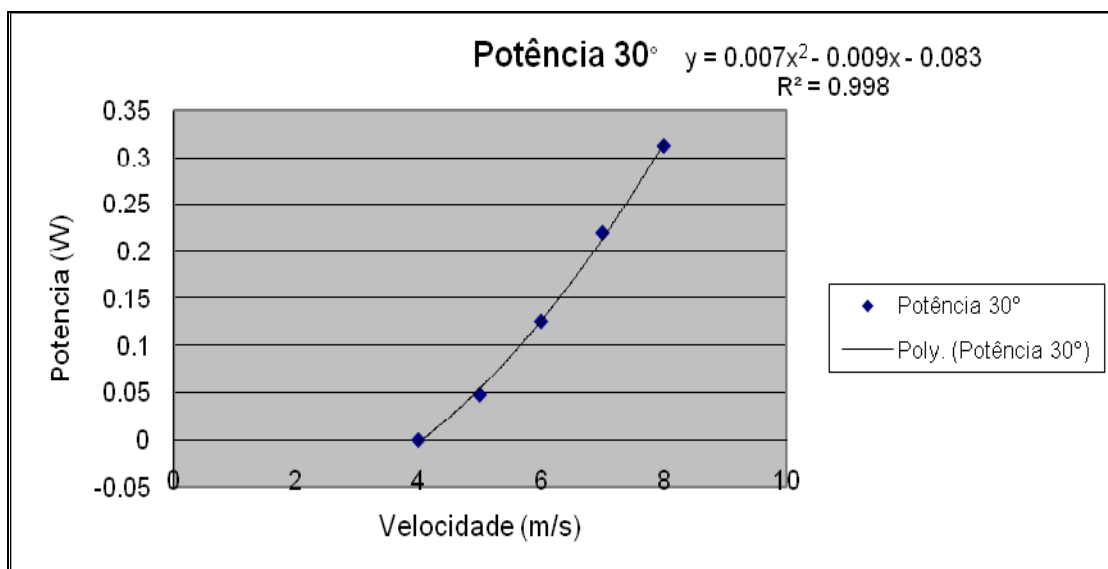


Figura 15. Gráfico do modelo matemático

O modelo matemático para a potência com um ângulo de ataque das pás de 15° é:

$$Y = 0,007X^2 - 0,009X - 0,083 \dots\dots\dots 5.2$$

Onde: X - Velocidade em m/s

Substituindo os valores da velocidade na expressão 5.2, temos:

X	Y
4	-0.007
5	0.047
6	0.115
7	0.197
8	0.293

Tabela 9. Valores da potência calculados a partir do modelo matemático

Comparando os valores da potência obtidos pelo modelo matemático e os valores obtidos no ensaio.

X	Y	Potência 30°
4	-0.007	0
5	0.047	0.048
6	0.115	0.126
7	0.197	0.22
8	0.293	0.312

Tabela 10. Valores da potência calculados a partir do modelo matemático e os obtidos a partir dos ensaios

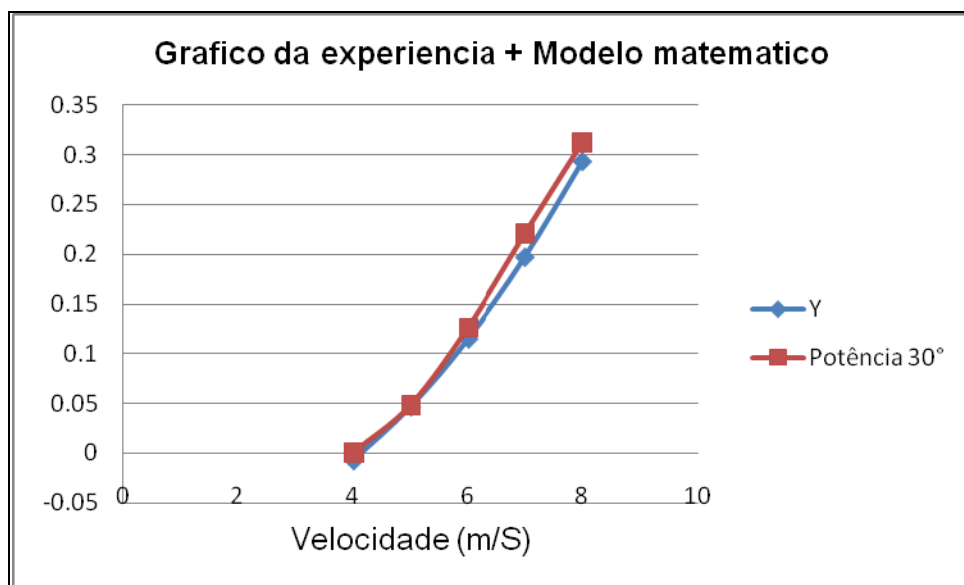


Figura 16. Gráfico da experiência + Modelo matemático

Com o aumento da velocidade, verifica-se um pequeno desvio entre o gráfico do modelo matemático e o obtido com base nos dados experimentais, o que leva a concluir que ele representa bem a situação real (é um modelo fiável).

### Ângulo de ataque de 45°

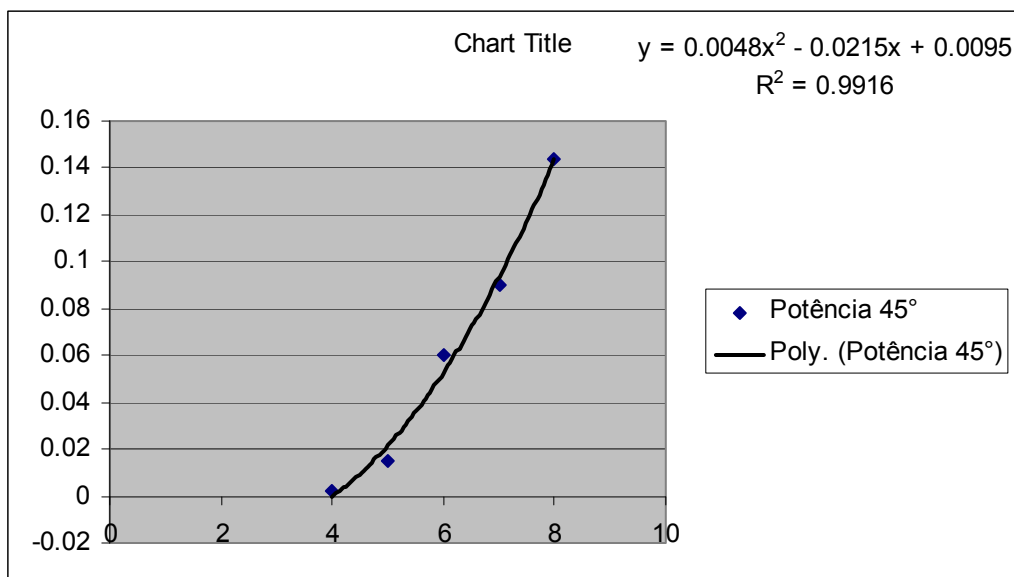


Figura 17. Gráfico do modelo matemático

O modelo matemático para a potência com um ângulo de ataque das pás de 15° é:

$$Y = 0,004X^2 - 0,021X + 0,009 \dots\dots\dots 5.3$$

Onde: X - Velocidade em m/s

Substituindo os valores da velocidade na expressão 5.3, temos:

X	Y
4	0.0003
5	0.022
6	0.0533
7	0.0942
8	0.1447

Tabela 11. Valores da potência calculados a partir do modelo matemático

Comparando os valores da potência obtidos pelo modelo matemático e os valores obtidos no ensaio.

X	Y	Potência 45°
4	0.0003	0.002
5	0.022	0.015
6	0.0533	0.06
7	0.0942	0.09
8	0.1447	0.144

Tabela 12. Valores da potência calculados a partir do modelo matemático e os obtidos a partir dos ensaios

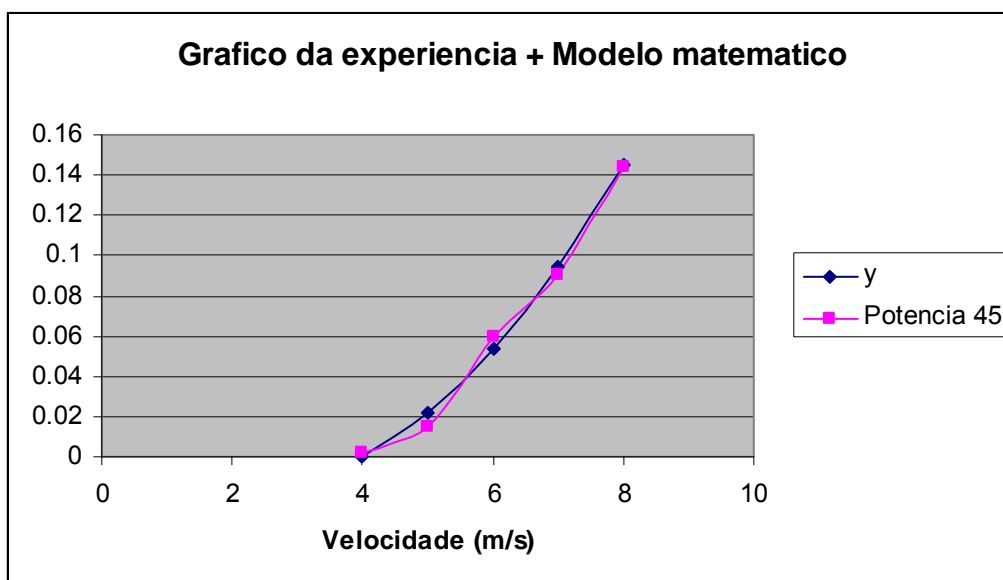


Figura 18. Gráfico da experiência + Modelo matemático

O modelo matemático tem pequeno desvio (pode-se considerar desprezível), concluindo-se assim que o modelo representa bem a situação real (é um modelo fiável).

### Ângulo de ataque de 55°

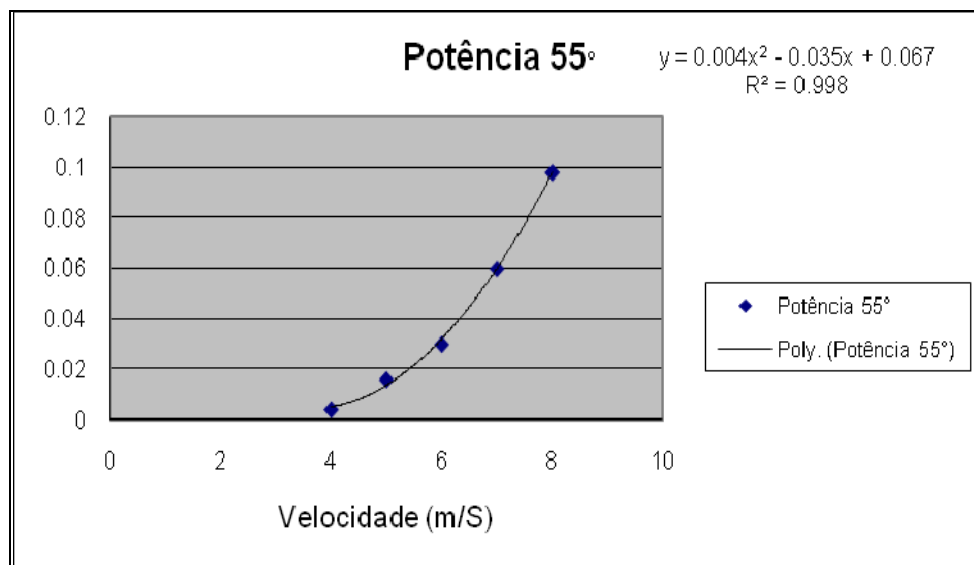


Figura 19. Gráfico do modelo matemático

O modelo matemático para a potência com um ângulo de ataque das pás de 15° é:

$$Y = 0,004X^2 - 0,035X + 0,067 \dots\dots\dots 5.4$$

Onde: X - Velocidade em m/s

Substituindo os valores da velocidade na expressão 5.4, temos:

X	Y
4	0.0055
5	0.004
6	0.027
7	0.058
8	0.097

Tabela 13. Valores da potência calculados a partir do modelo matemático

Comparando os valores da potência obtidos pelo modelo matemático e os valores obtidos no ensaio.

X	Y	Potência 55°
4	0.0055	0.004
5	0.004	0.016
6	0.027	0.03
7	0.058	0.06
8	0.097	0.098

Tabela 14. Valores da potência calculados a partir do modelo matemático e os obtidos a partir dos ensaios

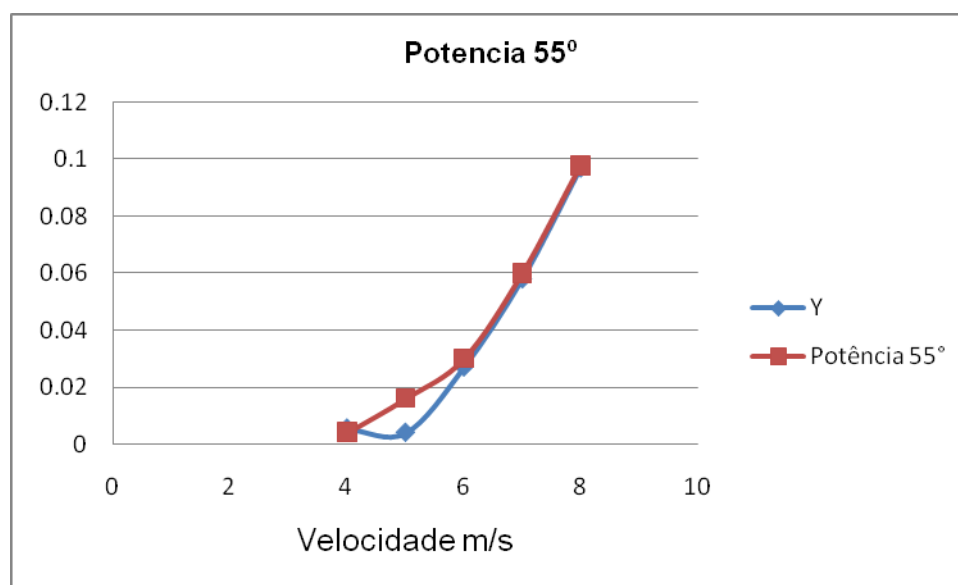


Figura 20. Gráfico da experiência + Modelo matemático

Entre o gráfico do modelo matemático e o gráfico dos dados experimentais verifica-se um desvio entre as velocidades de 5m/s a 6m/s, tornando-se consciente a partir da velocidade de 6m/s, tornando assim o modelo matemático fiável pois representa bem a situação real.



### Ângulo de ataque de 60°

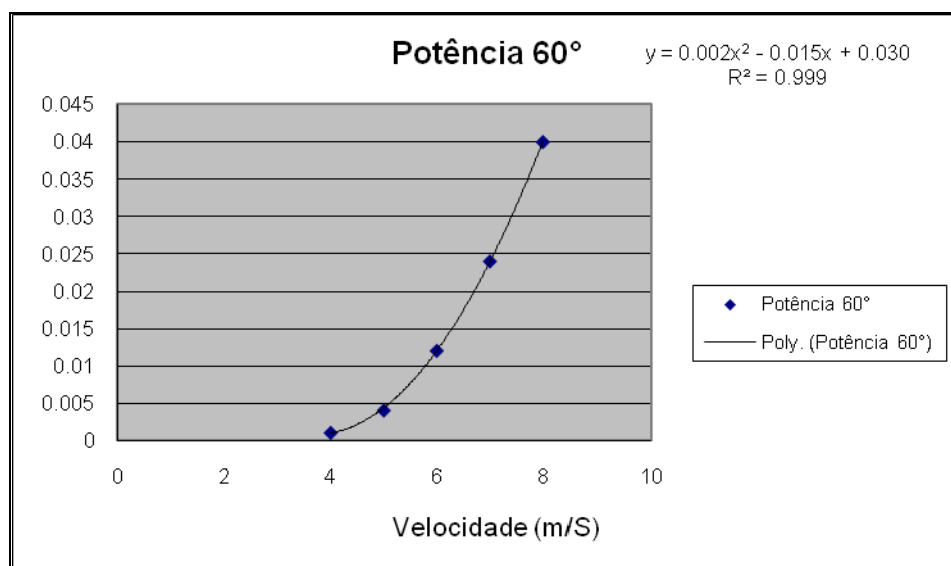


Figura 21. Gráfico do modelo matemático

O modelo matemático para a potência com um ângulo de ataque das pás de 15° é:

$$y = 0.002x^2 - 0.015x + 0.030 \dots\dots\dots 5.5$$

Onde: X - Velocidade em m/s

Substituindo os valores da velocidade na expressão 5.5, temos:

X	Y
4	0.002
5	0.005
6	0.012
7	0.023
8	0.038

Tabela 15. Valores da potência calculados a partir do modelo matemático

Comparando os valores da potência obtidos pelo modelo matemático e os valores obtidos no ensaio.

X	Y	Potência 60°
4	0.002	0.001
5	0.005	0.004
6	0.012	0.012
7	0.023	0.024
8	0.038	0.04

Tabela 16. Valores da potência calculados a partir do modelo matemático e os obtidos a partir dos ensaios

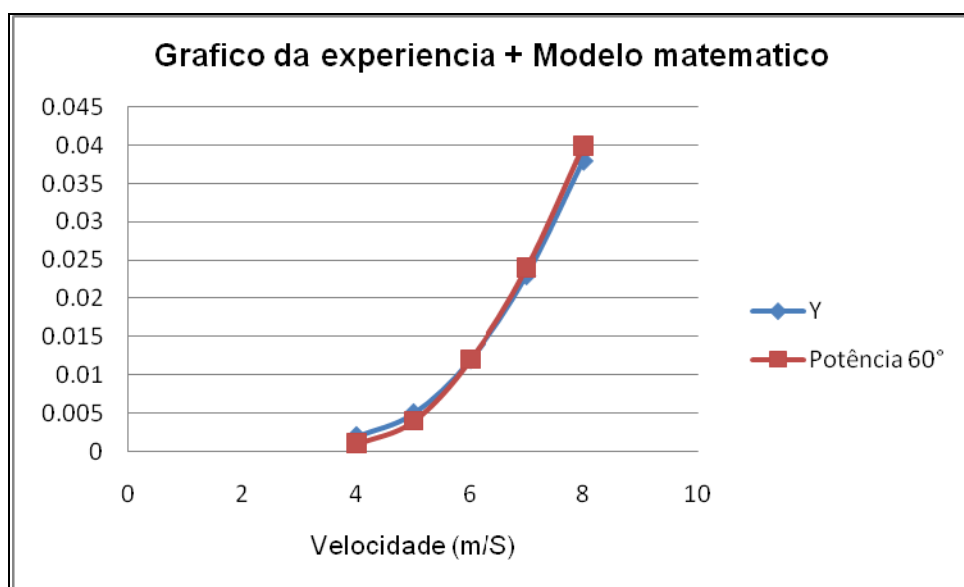


Figura 22. Gráfico da experiência + Modelo matemático

O gráfico do modelo matemático coincide com o gráfico experimental, sendo assim, ele representa bem a situação real (é um modelo fiável).



## 12. MODELO MATEMATICO GLOGAL

Foram feitos três modelos (tentativas) diferentes para determinar o que mais se adequa a situação real, os modelos são:

Modelo 1

$$p = -0,00362358 \times \theta + 0,048661890 \times V - 0,19316 \times 10^{-3} \times \theta \times V$$

Modelo 2

$$p = -0,36942836 + 0,013900481 \times \theta + 0,837448 \times 10^{-6} \theta^2 + 0,015815850 \times V + 0,013771429 \times V^2 - 0,00297007 \times \theta \times V$$

Modelo 3

$$p = 0,361209591 - 0,00391996 \times \theta + 0,837448 \times 10^{-6} \times \theta^2 - 0,10595714 \times V + 0,013771429 \times V^2$$

Onde : P – potência em W

A – ângulo

V- Velocidade em m/s

Com os modelos matemáticos desenvolvidos, determinou-se a potência desenvolvida pelo moinho, onde os resultados estão apresentados na tabela abaixo.

		Modelos		
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Velocidade	Ângulo	Potência	Potência	Potência
4	15	0.128704	-0.05533	0.099113
5	15	0.174469	0.055693	0.117099
6	15	0.220233	0.178443	0.162627
7	15	0.265998	0.328737	0.235699

**Autor:** Marcela Francisca Xavier da Costa

UEM - FE

**Supervisor:** Prof. Doutor. Jorge Olívio Penicela Nhambiu

8	15	0.311762	0.506573	0.336313
4	30	0.062761	-0.00865	0.040879
5	30	0.105628	0.04201	0.058865
6	30	0.148495	0.12021	0.104393
7	30	0.191362	0.225952	0.177465
8	30	0.234229	0.359237	0.278079
4	45	-0.00318	0.022599	-0.01698
5	45	0.036787	0.028704	0.001007
6	45	0.076757	0.062353	0.046536
7	45	0.116727	0.123544	0.119607
8	45	0.156696	0.212278	0.220222
4	55	-0.04714	0.043638	-0.05534
5	55	-0.00911	0.020043	-0.03735
6	55	0.028932	0.023991	0.008174
7	55	0.06697	0.055481	0.081245
8	55	0.105008	0.114515	0.181859
4	60	-0.06913	0.054221	-0.07446
5	60	-0.03205	0.015775	-0.05647
6	60	0.005019	0.004873	-0.01094
7	60	0.042091	0.021513	0.062127
8	60	0.079164	0.065696	0.162741

Tabela 17. Potencias calculadas usando os modelos matemáticos

### Representação gráfica dos resultados

No apresenta gráfico são apresentados curvas características que representam a potência calculada com base em 3 modelos matemáticos, e a curva que representa a potencia calculada a partir dos dados experimentais.

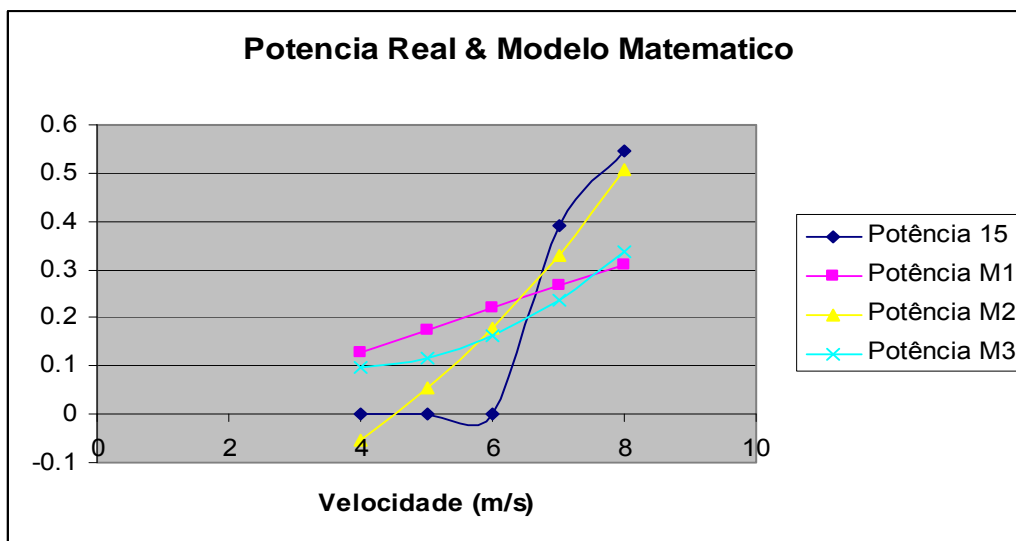


Figura 23. Representação gráfica dos modelos matemáticos para a o ângulo de 15°

Para a potência desenvolvida com o ângulo de ataque das pás de 15°, pode-se notar que os modelos M1 e M3 têm um grande desvio em relação aos dados experimentais, tendo os seus gráficos quase que perpendiculares ao gráfico real.

O modelo M2, embora entre as velocidades de 4-6 m/s tenha um grande desvio em relação ao gráfico real, ele é o que mais se aproxima-se ao gráfico real, quando actua com velocidades acima de 6m/s, o que o torna a melhor opção dentre os três modelos, sendo o que mais espelha a situação real.

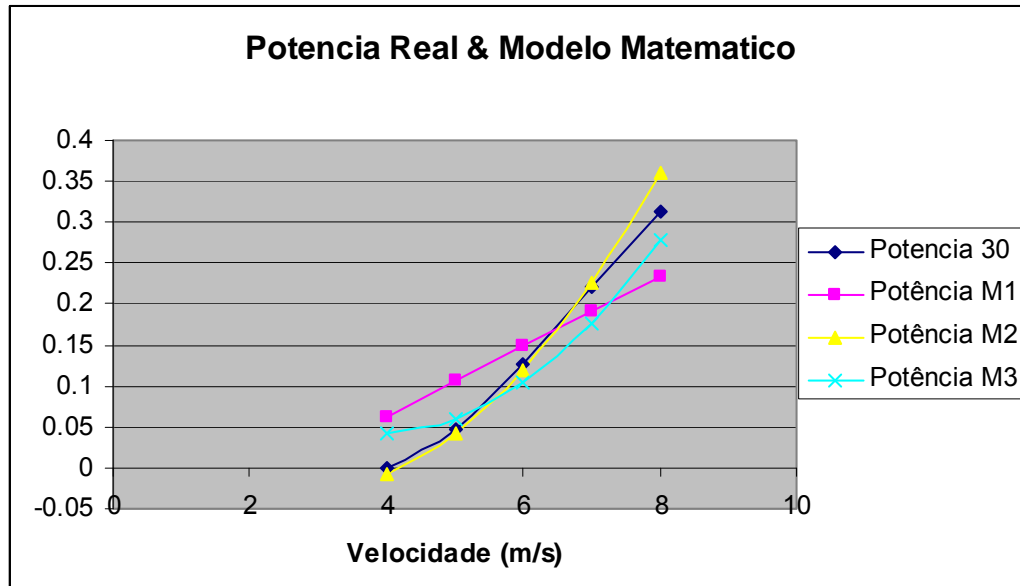


Figura 23.1 Representação gráfica dos modelos matemáticos para a o ângulo de 30°

Para a potência desenvolvida com o ângulo de ataque das pás de 30, pode-se notar que o gráfico do modelo M2 coincide exactamente com o gráfico experimental, verificando-se um desvio a velocidades acima de 7m/s, em que o modelo produz resultados superiores aos resultados experimentais.

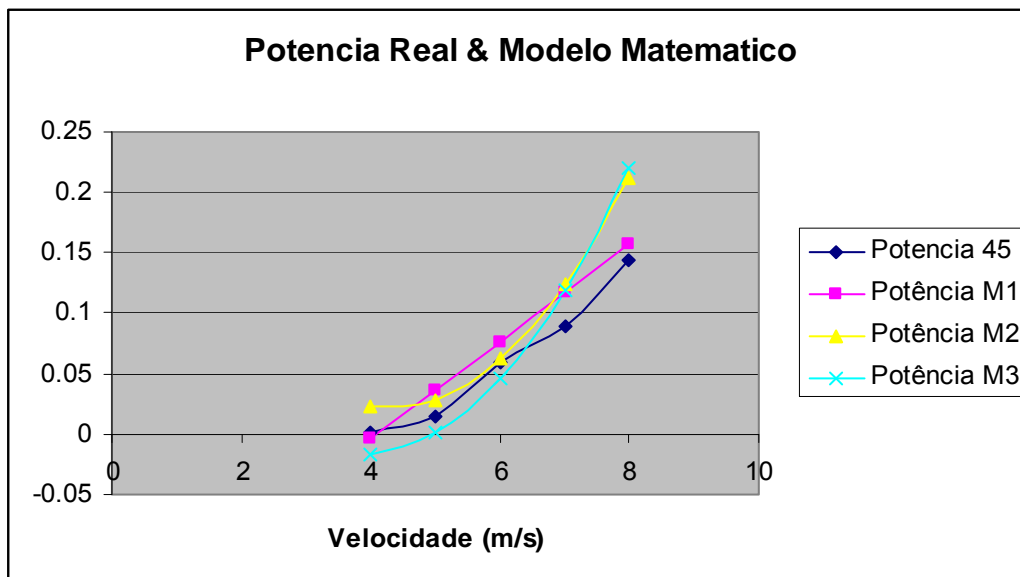


Figura 23.2 Representação gráfica dos modelos matemáticos para a o ângulo de 45°

Para a potência desenvolvida com o ângulo de ataque das pás de 45°, é de salientar que não existe um desvio muito acentuando entre os gráficos que representam os 3 modelos matemáticos e o gráfico dos dados experimentais, embora o modelo M3 desenvolva potências abaixo de zero com velocidades abaixo de 5m/s, e o modelo M1 apresente uma característica linear. Contudo, o gráfico do modelo M3 é o que mais se adequa ao gráfico experimental, tendo valores superiores aos resultados experimentais a velocidades abaixo e acima de 6m/s e coincidentes a velocidades de 6m/s.



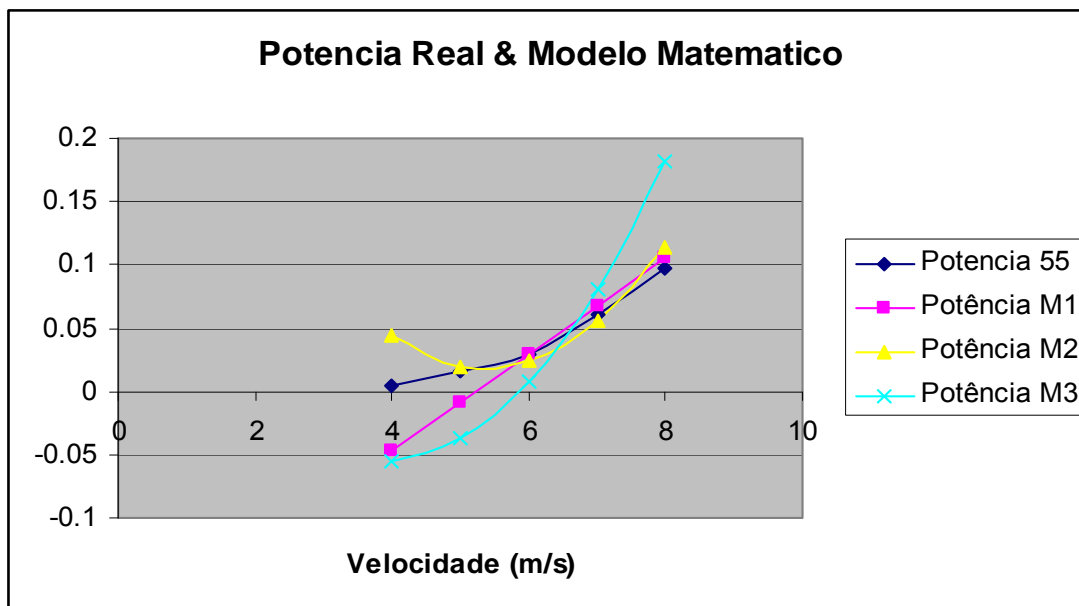


Figura 23.3 Representação gráfica dos modelos matemáticos para a o ângulo de 55°

Para a potência desenvolvida com o ângulo de ataque das pás de 55°, pode-se notar que os modelos M1 e M3 têm um grande desvio em relação aos dados experimentais, com velocidade abaixo de 6m/s produzem potências com valores abaixo de zero, tendo pontos em que os seus gráficos se cruzam.

Enquanto que o gráfico do modelo M2, só a baixas velocidades é que não coincide com o gráfico experimental, e com velocidades acima de 7m/s produz valores maiores em relação aos valores reais.

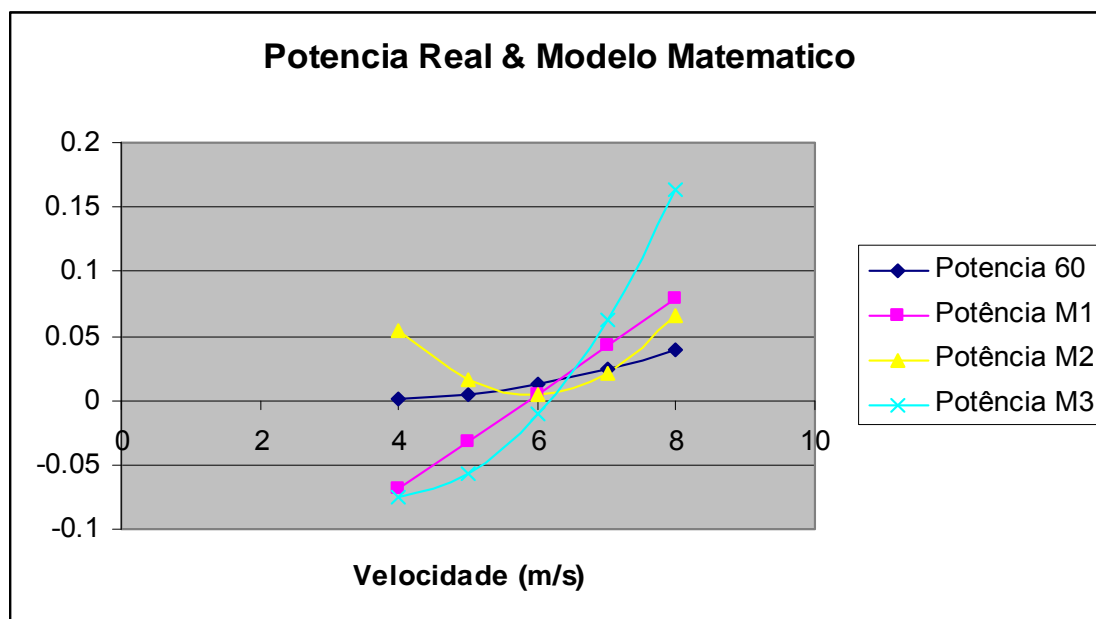


Figura 23.5 Representação gráfica dos modelos matemáticos para ao ângulo de 60°

Para o ângulo de ataque de 60°, os gráficos dos modelos M1 e M3 tem um acentuado desvio em relação ao gráfico experimental, produzindo valores de potência abaixo de zero a velocidades de 4-6 m/s, não representando assim as melhores opções para o modelo matemático.

O modelo matemático M2, embora produza resultados superiores aos experimentais a velocidades abaixo de 6m/s e acima de 7 m/s, é o que mais se adequa a situação real.

Segundo os gráficos, o modelo matemático que mais se adequa a realidade é o modelo 2, tendo em conta a maior aproximação da realidade.

A fórmula matemática do modelo 2 é:

$$p = -0,36942836 + 0,013900481 \times \theta + 0,837448 \times 10^{-6} \theta^2 + 0,015815850 \times V + 0,013771429 \times V^2 - 0,00297007 \times \theta \times V$$

Onde: P – potência em W

A – ângulo

V- Velocidade em m/s

## 10. CONCLUSÃO

Com o estudo feito, conclui-se que:

- Turbinas eólicas com menores ângulos de ataque, desenvolvem maiores potências, mais necessitam de maior velocidade de vento para a produção de energia. Com velocidades abaixo de 5m/s, a turbina não gira, como consequência não produz energia.
- Turbinas eólicas com maiores ângulos de ataque, desenvolvem menores potências em relação as turbinas com menor ângulos de ataque com a mesma velocidade do vento.

Com o aumento dos ângulos de ataque das pás, a turbina produz energia eléctrica com variação quase constante com o aumento das velocidades, embora de menor magnitude, chegando a atingir um aumento de 1 casa decimal com o aumento de velocidade na mesma proporção.

Com o modelo matemático desenvolvido, podemos aplicar para o estudo do comportamento das turbinas eólicas, variando as velocidades e os ângulos de ataque das pás

Para um país como o nosso (Moçambique), em que temos baixas velocidades do vento, e sem muita constância, aconselha-se a usar turbinas com maiores ângulos de ataque das pás.

## 11. BIBLIOGRAFIA

[1] <http://www.aondevamos.eng.br>

[2] - [www.mundodoquimico.hpg.om.br](http://www.mundodoquimico.hpg.om.br)

[3] - [mafalda@portugalmail.pt](mailto:mafalda@portugalmail.pt)

[4] - <http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica.htm>

[5] - [www.fem.unicamp.br/.../eolica/Image23.gif](http://www.fem.unicamp.br/.../eolica/Image23.gif)

[6] - <http://www.cresesb.cepel.br>

[7] – Apontamentos da cadeira de Energias Renováveis.

[8] - Manual de electrotecnia geral

## **14. ANEXOS**